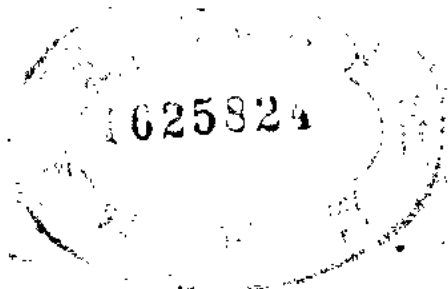


全国高等教育自学考试指导委员会物理专业委员会 建议试用教材

电动力学

郑锡琰 惠和兴 编著

1991/11/10



电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书是为参加高等教育自学考试的广大读者而编写的自学教材。《电动力学》主要内容分为五章,每章讲解其基本内容后,还指出了学习重点,并配有例题、习题和提示与答案,书后附有考试大纲与本书各章的对照表,供自学者参考。

《理论物理自学丛书》编委会

主编	喀兴林	章立源	蔡伯廉	
编委	卢圣治	宋玉升	吴 哲	郑锡珪
	胡 静	钱平凯	钱伯初	徐世良
	梁昆森	彭宏安	惠和兴	管 靖

(按姓氏笔划为序)

学术秘书 惠和兴

电动力学

郑锡珪 惠和兴 编著

责任编辑 宋玉升

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

河北省雄县电脑服务部排版

北京市玉兴联合胶印厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张: 14.5 字数: 350 千字

1992 年 4 月第 1 版 1992 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1-4000 册 定价: 8.00 元

书号: ISBN7-5053-1447-5/0·7

全国高等教育自学考试指 导委员会物理专业委员会

致 读 者

高等教育自学考试物理专业本科阶段设有理论力学、热力学与统计物理学、电动力学、量子力学以及数学物理方法等课程。这些课程理论要求较高，全日制高校的学生学习起来，也是不轻松的。对这些课程，国内已先后出版了许多很好的教科书，但这些教科书都是与系统讲授并辅之以其他辅助教学环节这种教学方式相适应的，对自学不尽合用。自学高考的考生及有志于提高自己物理素养的各方面读者，切望有一套与现有教材相比有不同特点的、比较适合于自学的理论物理自学教材供他们使用。值得高兴的是，许多高校有经验的教师、专家和出版社都热情支持理论物理自学教材的出版工作。课程的自学考试大纲只规定了每门课程的自学和考试的要求，不同的作者根据大纲编写的教材，还能反映作者对课程内容的理解和体会，还有自己的讲述方式和自己的特色。我们认为，发动社会力量编写和出版符合大纲要求的，不同风格的理论物理自学教材供读者选用，无疑是有益的。电子工业出版社组织的这套《理论物理自学丛书》将是最早出版的一套，《丛书》的内容符合自学考试大纲的要求，并力求适应自学的特点。

物理专业委员会将这套《理论物理自学丛书》作为自学考试“建议试用”教材之一，愿这套自学丛书对自学考试、成人教育，对工程技术人员和全日制高校的教师和学生都有裨益。

全国高等教育自学考试指
导委员会物理专业委员会
一九八八年四月

前 言

本书是理论物理自学丛书中的一本,是为已通过自学考试取得大专学历并准备进一步学习本科课程的读者编写的自学教材。电动力学是理论物理的重要组成部分,是物理专业本科生必修的基础理论课。在学习本课程之前,必须先学习电磁学、数学物理方法和矢量分析等课程。本课程的任务是系统阐述电磁运动的基本规律及电磁场和物质的相互作用。狭义相对论的发展与对电磁运动的深入研究有密切关系,并为电磁场的求解提供了某些更简捷的方法,因此也归入本书,尽管它本身的意义已远远超出电磁学的范畴。目前,我国已出版和翻译出版的电动力学教材有很多种,适合于各不同层次,但便于自学的教材尚少,而且这少数几种教材内容又偏少,不能满足自学考试的要求。本书是直接针对准备参加自学考试的读者的,对他们来说,选用本书作为主要参考书,也许是较为恰当的。

电动力学作为一门理论课程,有着比电磁学更严谨更完整的理论结构,更多地使用数学语言表述定律、定理和物理结论,用更高等的数学工具研究和解决问题,内容的深度也大大提高了。因此,学习方法也要作相应改变。即便是在校学生,也总有不少人因不能适应这一改变而成绩明显下降。为此,我们提出如下几点意见供读者参考:① 不能只满足于了解一些现成的结论,而是要注意这些结论是如何从为数不多的几条基本原理中导出的,这些原理又是如何从实验中总结出来的,在从实验上升为理论的过程中,包含了哪些新的假设,它们又是如何接受新的实验检验的。② 要尽快地熟悉和掌握必要的数学工具,而不是回避它。没有必要的数学工具,处理复杂一些的问题几乎是不可能的。③ 尽管数学工具是重要的,但必须明确,物理课程与数学终究是有区别的。在根据普遍原理讨论一些具体问题时,会不断地加进一些物理考虑,作出适当的近似。

在求解微分方程时,数学中往往较多地关心通解,而在物理中,许多场合更多地关心的是某些有特殊意义的特解。因此,清晰的物理概念和把物理问题翻译成适当的数学问题的能力仍是第一位的。④我们的课程是一门基础理论课,对于掌握电磁运动规律来说仍是初步的,不可能在这一轮学习中解决所有问题。可以看出,对有些问题,我们是有意地在回避最严格、最普遍的数学证明,这样做是出于教学上的考虑,并不等于电磁学理论本身不严格。有些较专门的问题,可以在学完本课程之后再去进一步研究。总之,在学习过程中,要不断根据情况调整自己的学习方法,做到事半功倍。

在编写本书的过程中,曾不断得到《理论物理自学丛书》编委会诸位成员的关心,尤其是主编喀兴林教授和北京大学的章立源、蔡伯濂教授对本书的选材和编写体例提出了许多宝贵意见。北京大学彭宏安教授审阅了全部书稿,并和编者进行过多次有益的讨论,在此一并致谢。由于编者水平所限,本书的缺点肯定不少,恳请专家们批评指正,以便再版时修订。

编者 1990.11.

目录

致读者	(I)
前言	(II)
绪论	(1)
§ A.1 电动力学简介	(1)
§ A.2 矢量分析	(3)
[1] ∇ 算符	(4)
[2] 两次微商	(6)
[3] 乘积的微商	(8)
[4] 有关矢径 R 的运算	(10)
[5] 积分变换公式	(13)
[6] 球坐标系和柱坐标系中的重要表达式	(18)
习题	(19)
第一章 静电场	
§ 1.1 电荷相互作用的实验规律	(22)
[1] 库仑定律	(22)
[2] 电力叠加原理	(24)
§ 1.2 电场	(24)
[1] 电场强度	(25)
[2] 场强叠加原理	(26)
[3] 电力线	(28)
[4] 库仑力公式	(28)
§ 1.3 真空中的静电场方程	(29)
[1] 高斯定理	(29)
[2] 高斯定理的微分形式	(31)
[3] δ 函数	(32)
[4] 静电场的环路定理	(35)
[5] 环路定理的微分形式	(36)
[6] 结论	(36)
[7] 例题	(37)

习题	(39)
§1.4 静电势	(40)
[1] 静电场的标势	(40)
[2] 电势的叠加	(41)
[3] 电势的物理意义	(41)
[4] 电势零点	(42)
[5] 等势面	(43)
[6] 点电荷的电势	(45)
[7] 连续分布电荷的电势	(46)
[8] 结论	(47)
[9] 例题	(48)
习题	(55)
§1.5 电荷系统在远处的电势	(57)
[1] 电势的多极展开	(57)
[2] 单极势	(59)
[3] 偶极势	(60)
[4] 四极势	(61)
[5] 结论	(63)
[6] 例题	(64)
习题	(66)
§1.6 电介质中的静电场方程	(67)
[1] 电介质和静电场的相互影响	(68)
[2] 极化强度	(68)
[3] 面束缚电荷	(69)
[4] 体束缚电荷	(70)
[5] 介质中的静电场方程	(72)
[6] 介质的性质方程	(73)
[7] 结论	(75)
[8] 例题	(77)
习题	(80)
§1.7 静电场的边值关系	(82)
[1] 电位移法向分量的边值关系	(82)

[2] 电场强度切向分量的边值关系	(84)
[3] 电势的边值关系	(86)
[4] 有导体存在时的边值关系	(87)
习题	(89)
§1.8 泊松方程和拉普拉斯方程	(90)
[1] 电势满足的微分方程	(91)
[2] 例题	(93)
习题	(96)
§1.9 静电场的唯一性定理	(98)
[1] 普遍情况下的唯一性定理	(98)
[2] 有导体存在时的唯一性定理	(99)
[3] 导体组的叠加定理	(103)
[4] 例题	(105)
习题	(110)
§1.10 电象法	(112)
[1] 概述	(112)
[2] 例题	(113)
习题	(126)
§1.11 分离变量法	(130)
[1] 球坐标系中拉普拉斯方程的轴对称解	(130)
[2] $1/R$ 按勒让德多项式展开	(132)
[2] 分离变量法解静电问题的步骤	(135)
[4] 例题	(136)
习题	(145)
本章小结	(148)
第二章 稳定电流和稳定磁场	
§2.1 电流	(153)
[1] 电流密度	(153)
[2] 电荷守恒定律	(155)
[3] 欧姆定律的微分形式	(157)
[4] 焦耳定律的微分形式	(158)

§2.2 稳定电流场	(158)
[1] 稳定电流场的基本方程	(159)
[2] 稳定电流场的电势及其微分方程	(160)
[3] 稳定电流场的边值关系	(162)
[4] 例题	(165)
§2.3 解稳定电流场的静电类比法	(167)
[1] 代换关系	(167)
[2] 例题	(169)
习题	(175)
§2.4 稳定磁场	(176)
[1] 安培定律 磁感应强度	(177)
[2] 毕奥—萨伐定律	(178)
[3] 磁场叠加原理	(180)
[4] 磁力线	(183)
§2.5 真空中的稳定磁场方程	(184)
[1] 磁场的高斯定理	(184)
[2] 安培环路定理	(185)
[3] 证明 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	(186)
[4] 证明 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$	(187)
习题	(189)
§2.6 稳定磁场的矢势	(189)
[1] 矢势 $\mathbf{A}$ 的引入	(190)
[2] 规范变换 库仑规范	(190)
[3] 矢势的微分方程	(192)
[4] 例题	(194)
习题	(199)
§2.7 矢势的磁多极展开	(201)
[1] 线电流在远处的矢势	(201)
[2] 磁偶极势	(202)
[3] 电流系统的磁偶极矩	(204)
[4] 磁多极展开的物理意义	(206)
§2.8 磁介质中的稳定磁场方程	(207)

[1] 介质的磁学模型	(207)
[2] 磁化强度	(208)
[3] 磁化电流	(209)
[4] 有介质时稳定磁场的基本方程	(212)
[5] 介质的性质方程	(213)
[6] 例题	(215)
§ 2.9 稳定磁场的边值关系	(217)
[1] 磁感应强度法向分量的边值关系	(217)
[2] 磁场强度切向分量的边值关系	(218)
习题	(219)
§ 2.10 磁标势法	(220)
[1] 磁标势	(220)
[2] 磁标势的微分方程和边值关系	(222)
[3] 解静磁问题的镜像法	(224)
[4] 分离变量法在静磁问题中的应用	(228)
习题	(231)
§ 2.11 永磁体的磁场	(232)
[1] 电流观点	(233)
[2] 磁荷观点	(237)
[3] 例题	(240)
习题	(242)
本章小结	(243)
第三章 电磁场的普遍规律	
§ 3.1 法拉第电磁感应定律	(251)
§ 3.2 麦克斯韦的两个基本假设	(252)
[1] 涡旋电场假设	(252)
[2] 位移电流假设	(254)
§ 3.3 电磁场的基本方程	(257)
[1] 麦克斯韦方程组	(257)
[2] 洛伦兹力公式	(259)
[3] 电磁场的边值关系	(260)

习题	(261)
§3.4 电磁场的波动性	(262)
[1] 电磁场的波动方程	(262)
[2] 平面电磁波	(265)
§3.5 电磁场的能量	(268)
[1] 电磁场对带电体所作的功	(268)
[2] 电磁场的能量	(270)
[3] 静电场的能量	(271)
[4] 恒定磁场的能量	(272)
[5] 电磁能流	(275)
[6] 例题	(279)
习题	(280)
§3.6 电磁场的动量	(282)
[1] 电磁场对带电体的作用力	(282)
[2] 电磁场的动量	(283)
[3] 电磁波的动量流密度	(285)
[4] 电磁场的物质性	(288)
本章小结	(290)
第四章 电磁波的传播和辐射	
§4.1 导电媒质中的电磁波(概述)	(293)
[1] 导电媒质中电磁波的基本方程	(294)
[2] 导电媒质中的平面单色波	(296)
[3] 导电媒质中电磁波的性质	(298)
§4.2 良导体、不良导体和等离子体中的电磁波	(301)
[1] 良导体和不良导体	(302)
[2] 不良导体中电磁波的性质	(303)
[3] 良导体中电磁波的性质	(304)
[4] 等离子体中的电磁波	(305)
习题	(306)
§4.3 电磁波的偏振	(307)
[1] 线偏振波	(307)

[2] 圆偏振波和椭圆偏振波	(309)
习题	(313)
§ 4.4 电磁波在两种介质分界面上的反射和折射	(314)
[1] 反射和折射定律	(316)
[2] 菲涅耳公式	(318)
[3] 反射系数和透射系数	(321)
习题	(324)
§ 4.5 几种特殊情况下的反射波	(325)
[1] 布儒斯特现象	(325)
[2] 半波损失	(326)
[3] 全反射	(329)
[4] 电磁波在导体表面上的反射	(333)
习题	(337)
§ 4.6 电磁波在波导管中的传播	(338)
[1] 边界条件及其对波型的限制	(339)
[2] 定态电磁波的边值问题	(341)
[3] 矩形波导管中的电磁波	(344)
[4] 波型	(347)
[5] 截止频率和相速度	(348)
[6] 几种低次波型的场结构	(350)
[7] TE_{10} 型波传播的物理图象	(354)
习题	(356)
§ 4.7 电磁场的矢势和标势	(358)
[1] 矢势和标势	(358)
[2] 规范变换和规范不变性	(359)
[3] 电磁势满足的微分方程	(361)
[4] 推迟势	(362)
习题	(365)
§ 4.8 电偶极辐射	(367)
[1] 赫兹振子	(367)
[2] 振荡电偶极子的电磁场	(369)
[3] 似稳区的场	(373)

[4] 辐射区的场	(375)
习题	(378)
本章小节	(379)
第五章 狭义相对论	
§ 5.1 狭义相对论的实验基础	(385)
[1] 伽利略变换 经典力学的相对性原理	(386)
[2] 几个重要的实验	(388)
§ 5.2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	(396)
[1] 狭义相对论的基本原理	(396)
[2] 洛伦兹变换	(398)
[3] 速度变换公式	(402)
§ 5.3 相对论时空理论的讨论	(403)
[1] 运动物体的长度收缩	(404)
[2] 运动的时钟变慢(时间延缓)	(405)
[3] 同时的相对性	(406)
[4] 时间次序问题和因果律	(406)
[5] 例题	(408)
习题	(411)
§ 5.4 相对论理论的四维形式	(413)
[1] 三维空间的正交变换	(413)
[2] 洛伦兹变换的四维形式	(415)
[3] 标量、矢量和张量	(418)
[4] 物理规律的协变性	(421)
习题	(422)
§ 5.5 相对论电动力学	(422)
[1] 四维电流密度和四维势矢量	(422)
[2] 麦克斯韦方程组的协变形式	(425)
[3] 匀速运动带电粒子的电磁场	(428)
习题	(430)
§ 5.6 相对论力学	(431)
[1] 相对论动力学方程的建立	(432)

[2] 相对论动力学方程的主要结论	(434)
习题	(437)
本章小结	(438)
附录 电动力学自学考试大纲	(442)

绪论

本书是为自学者编写的电动力学教材。在编写过程中,参照了高等教育自学考试大纲和全国高等教育自学考试委员会制订的自学考试计划,并考虑了自学的特点。内容包括两部分,第一部分是宏观电动力学,第二部分是狭义相对论,大体上相当于高等师范院校物理专业电动力学课程的内容。在取材上,在适当照顾系统性的同时,注意了突出重点,保证重点内容达到应有的深度。此外,还围绕重点内容编入了少量选学内容,并以“*”标明,略去这些不学并不影响后面章节的学习。我们希望本书能成为准备参加自学考试的读者以及因工作需要而学习本课程的科技人员的合适教材,同时相信,对于综合大学和师范院校物理专业和工科院校相近专业的大学生,也有一定的参考价值。

§A.1 电动力学简介

电动力学的基本理论是在研究电磁现象的基础上建立起来的。简略地回顾一下电磁学的发展历史,对于学好本课程是很有好处的。

人类对电磁现象的认识可追溯到公元前六世纪,但在很长一段时间内只停留在对自然现象的观察上,并且认为电现象和磁现象是互不相关的,是完全独立的两类现象。直到1785年库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)通过实验建立了库仑定律,1819年奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1862)、萨伐(Savart, 1791—1841)在安培实验的基础上建立了电流产生磁场的定量规律,才开始认识到电和磁之间的联系,使电磁学成为较系统的科学。1831年,法拉第(M. Faraday, 1791—1867)发现了电磁感应现象,从而发现了电

和磁之间的相互影响、相互转换现象,从此,电磁学开始进入建立统一电磁理论的阶段。当时电磁学已建立了三个重要的实验规律,即库仑定律,毕—萨定律和法拉第定律。麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在前人工作的基础上,通过分析、比较实验资料和已知规律之间的关系和矛盾,特别是在法拉第“力线”和“场”的概念启发下,提出了涡旋电场和位移电流的假设,即变化的磁场激发电场,变化的电场激发磁场,成功地完成了电磁学的理论总结工作,于1864年发表了统一的电磁场理论,即麦克斯方程组。

麦克斯韦根据他得出的方程组从理论上预言,统一的电磁场将以横波的形式在空间传播,形成电磁波,并且解释了许多光学现象和定律。1880年赫芝(H. Hertz, 1857—1894)第一次从实验上证实了电磁波的存在,完全证实了麦克斯韦的假设和理论的正确性,并导致了无线电通讯技术的发展。尔后,人们又陆续发现了紫外线、X射线和 γ 射线,并证明了它们都是电磁波,它们与可见光的差别只在于波长更短。

麦克斯韦的工作使人类对自然的认识产生了一个飞跃,它不仅使电磁现象和光现象有了统一的理论解释,而且给科学技术带来了巨大变革。在物理学史上,这是从实践上升为理论,理论又指导实践的一个范例。

麦克斯韦的电磁理论不仅完成了电磁学理论的飞跃,而且还孕育了新的物理突破。由麦克斯韦方程组得出的一个重要结论是电磁波以光速传播。在导出这一结论的过程中没有特殊参照系的限制,这实际上包含了狭义相对论的内容。1905年,爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)发表了开创性的论文《论动体的电动力学》,建立了狭义相对论,把电磁运动和时间、空间概念更紧密地联系起来。

从物理内容上讲,电动力学是在学完了电磁学课程之后,从基本运动规律出发,进一步研究电磁场的各种运动形态以及它们和带电体的相互作用等的一门理论物理课程。在电磁学课程中,我们

是从电和磁的实验现象出发,总结几个实验规律,并在研究了各种特殊的电磁现象之后,逐步归纳出电磁现象的普遍规律。由于数学工具的限制,在电磁学课程中不可能对电磁现象的本质作进一步的揭示。电动力学的基本线索则是从分析几个实验定律出发,从中找出具有普遍意义的因素,把特殊规律加以推广,得到具有普遍意义的规律,然后应用理论上得到的普遍规律去分析各种电磁现象,尤其是分析电磁场与带电物质的相互作用、相互影响,从而进一步丰富和发展这些规律。在电动力学课程中,不但有许多物理概念和原理,而且有大量的数学推导和公式,它们以简洁的形式表述了物理规律及其联系。学习电动力学,不仅要注意规律本身的物理内容,也要注意掌握定量描述物理现象及其规律的数学方法。

在建立电动力学的基本方程及解决具体问题,必要的数学工具是矢量分析,同时还要了解数学物理方程的某些内容。在编写本书时,我们尽量避免内容过分数学化,但又充分考虑到初学者(特别是自学本课程的读者)在数学上可能遇到的困难。为此,我们在内容安排上尽量注意电磁学和电动力学课程的衔接,对较复杂的数学推导,增加了思路说明和一般教材中略去的一些中间过程。这样,表面上看数学式子多了些,实际上也许是更便于自学了。当然,我们仍给读者留下了足够的练习机会。

我们希望通过本书的学习,能使读者掌握电磁场的基本规律、电磁场的主要物理性质、计算电磁场的基本方法、狭义相对论的基本原理以及相对论电动力学的有关概念;初步获得用电动力学知识分析和处理一些典型问题的能力,为进一步学习有关专业课和查阅有关文献打下必要的基础。

§A.2 矢量分析

矢量分析是学习电动力学的重要数学工具。考虑到初学者的需要,我们先复习一下学习本课程所必须的矢量分析知识。